

NUMERISCHES MODELL FÜR DIE SIMULATION EINER LASERSTRAHLSCHWEIßUNG VON QUARZGLAS

Michael Göbel^{*}, Jörg Hildebrand und Frank Werner

^{*} *Bauhaus-Universität Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen, Professur Stahlbau, Marienstraße 5, 99423 Weimar, Deutschland*
E-Mail: michael.goebel@bauing.uni-weimar.de

Schlagwörter: CO₂-Laserstrahlschweißen, Quarzglas, numerisch nichtlineare Simulation, temperaturabhängiges Materialverhalten, rheologische Modelle, SYSWELD[®].

Abstrakt. *Ausgehend von den fundierten Erfahrungen, die für das Schweißen von verschiedensten Metallen vorliegen, wird an der Professur Stahlbau der Bauhaus-Universität Weimar ein neuartiges Verfahren zum CO₂-Laserstrahlschweißen von Quarzglas numerisch untersucht. Dabei kommt die kommerzielle FE-Software SYSWELD[®] zum Einsatz. Die erforderlichen Versuche werden in Zusammenarbeit mit dem Institut für Fügetechnik und Werkstoffprüfung GmbH aus Jena realisiert.*

Die numerische Analyse wird eingesetzt, um geeignete Prozessparameter zu bestimmen und deren Auswirkungen auf die transienten thermischen und mechanischen Vorgänge, die während des Schweißvorgangs ablaufen abzubilden.

Um die aus der Simulation erhaltenen Aussagen zu überprüfen, ist es erforderlich, das Berechnungsmodell mittels Daten aus Versuchsschweißungen zu kalibrieren. Dabei sind die verwendeten Materialmodelle sowie die der Simulation zugrunde gelegten Materialkennwerte zu validieren.

Es stehen verschiedene rheologische Berechnungsmodelle zur Auswahl, die die viskosen Materialeigenschaften des Glases abbilden. Dabei werden die drei mechanischen Grundelemente, die HOOKEsche Feder, der NEWTONsche Dämpfungszylinder und das ST.-VENANT-Element miteinander kombiniert.

Die Möglichkeit, thermische und mechanische Vorgänge innerhalb des Glases während des Schweißvorgangs und nach vollständiger Abkühlung, vorhersagen zu können, gestattet es den Schweißvorgang über eine Optimierung der Verfahrensparameter gezielt dahingehend zu beeinflussen, die Wirtschaftlichkeit des Schweißverfahrens zu verbessern, und ein zuverlässiges Schweißergebnis zu erhalten. Dabei können auch nur unter hohem experimentellen Aufwand durchführbare Versuche simuliert werden, um eine Vorhersage zu treffen, ob es zweckmäßig ist, den Versuch auch in der Praxis zu fahren. Dies führt zu einer Reduzierung des experimentellen Aufwandes und damit zu einer Verkürzung des Entwicklungszeitraumes für das angestrebte Verfahren.

1 EINLEITUNG

Numerische Methoden gewinnen bei der Erforschung und Entwicklung neuer und innovativer Verfahren in der Fügechnik immer mehr an Bedeutung. Ein Beispiel dafür ist die Entwicklung eines neuartigen Fügeverfahrens bei dem Quarzglaserzeugnisse mittels eines CO₂-Lasers verschweißt werden. Die Entwicklung dieses Verfahrens erfordert einen hohen numerischen und experimentellen Aufwand, da Erfahrungen zum Laserstrahlschweißen von Glas bisher kaum vorliegen. Der Vorteil eines Fügeverfahrens ohne Werkstoffwechsel besteht in einer optisch und mechanisch optimalen Verbindung, die zudem auch bei hohen Temperaturen keine Festigkeitsverluste aufweist.

Die Schwierigkeiten bei der Entwicklung eines solchen Verfahrens sind in den Materialeigenschaften des verwendeten Glases begründet. Aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit in Verbindung mit dem spröden Materialverhalten bei Raumtemperatur entstehen während des Schweißens innerhalb der Wärmeeinflusszone große Spannungen, die den Bruch des Materials verursachen können. Weiterhin führt die geringe Wärmeleitfähigkeit des Quarzglases zu Problemen bei der Ausführung einer durchgehenden Schweißnaht und erfordert daher ein speziell angepasstes Schweißverfahren, das es ermöglicht den Temperaturunterschied zwischen Nahtwurzel und Nahtoberseite zu reduzieren. Die Mindesttemperatur innerhalb des Schmelzbades darf dabei 1750 °C nicht unterschreiten.

Die numerische Analyse wird eingesetzt, um geeignete Prozessparameter zu bestimmen und deren Auswirkungen auf die transienten thermischen und mechanischen Vorgänge, die während des Schweißvorgangs ablaufen abzubilden.

Die Berechnung wird in zwei Schritten durchgeführt, einem thermischen und einem mechanischen. Die thermische Simulation erfolgt über die Formulierung des Energieeintrags, der Wärmeleitungs- und Strahlungsbedingungen innerhalb des semitransparenten Materials sowie der Konvektion und Strahlung an die Umgebung. Aufgrund der transienten Berechnungsweise kann das Temperaturfeld innerhalb des Glases während des Schweißvorgangs zeitabhängig dargestellt werden.

Basierend auf den Ergebnissen der thermischen Simulation wird die mechanische Simulation durchgeführt, in der Verformungen und die daraus resultierenden Spannungen berechnet werden. Dazu wird das bestehende transiente Temperaturfeld mit dem mechanischen Berechnungsmodell gekoppelt und über die Wärmedehnung eine Beanspruchung in das Modell eingebracht.

2 EXPERIMENTELLE SCHWEIßUNGEN

In Zusammenarbeit mit dem Institut für Fügechnik und Werkstoffprüfung in Jena wurden zwei Versuchsreihen von Stumpfnähten an 2 mm bzw. 6 mm dicken Quarzglasplatten realisiert (Abbildung 1). Zur Verifikation der numerischen Ergebnisse erfolgten bei jeder Schweißung transiente Temperaturmessungen in insgesamt fünf Punkten auf Ober- und Unterseite der Quarzglaselemente. Für die Temperaturmessung werden Thermoelementen (Typ K, Drahtdurchmesser 0,08 mm) eingesetzt. Zur Fixierung der Quarzglasplatte wird ein Hebel eingesetzt, welcher eine punktuelle Stützung auf der Oberseite der Quarzglasplatte ermöglicht. Die dabei auftretende Belastung ist vernachlässigbar gering. In der ersten Versuchsreihe wurde der Laserstrahl mit einer Schweißgeschwindigkeit von 3 mm/s und einer Gesamtleistung von 670 W über die Probestücke bewegt. Dabei wurden jeweils zwei Quarzglasplatten $l \times b \times h = 41 \times 15 \times 2$ [mm] mittels Stumpfnahnt verschweißt. In einer zweiten Versuchsreihe

wurden Quarzglasplatten mit einer Abmessung $l \times b \times h = 75 \times 24,5 \times 6$ [mm] verschweißt. Die gesamte Laserausgangsleistung betrug 508 W und die Schweißgeschwindigkeit variierte zwischen 0,3 mm/s und 0,4 mm/s.

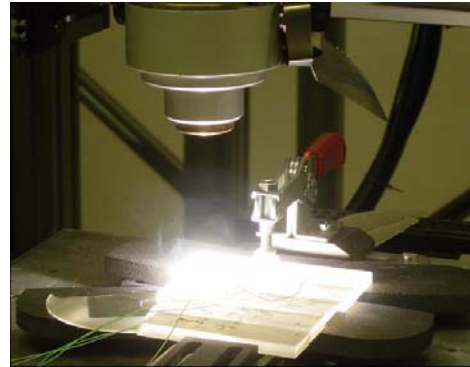
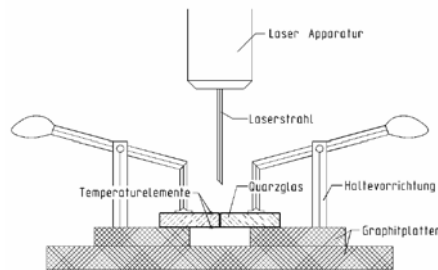


Abbildung 1: Laserstrahlschweißen von Quarzglasplatten - Versuchsaufbau und experimentelle Durchführung

3 MATERIALEIGENSCHAFTEN DES QUARZGLASES

Während des Schweißvorgangs durchläuft das Quarzglas einen Temperaturbereich von Raumtemperatur (20 °C) bis oberhalb einer festgelegten Erweichungstemperatur (> 1750 °C). Die Materialeigenschaften des Quarzglases ändern sich dabei signifikant. Daher ist es notwendig, temperaturabhängige Materialkennwerte in der Simulation zu benutzen und damit die Berechnung nichtlinear durchzuführen. Allgemein zeichnet sich Quarzglas durch eine im Vergleich zu Metallen sehr geringe Wärmeleitfähigkeit und Wärmedehnung aus. Eine Auswahl der wichtigsten thermischen Materialkennwerte in Abhängigkeit der Temperatur ist in den folgenden Diagrammen dargestellt.

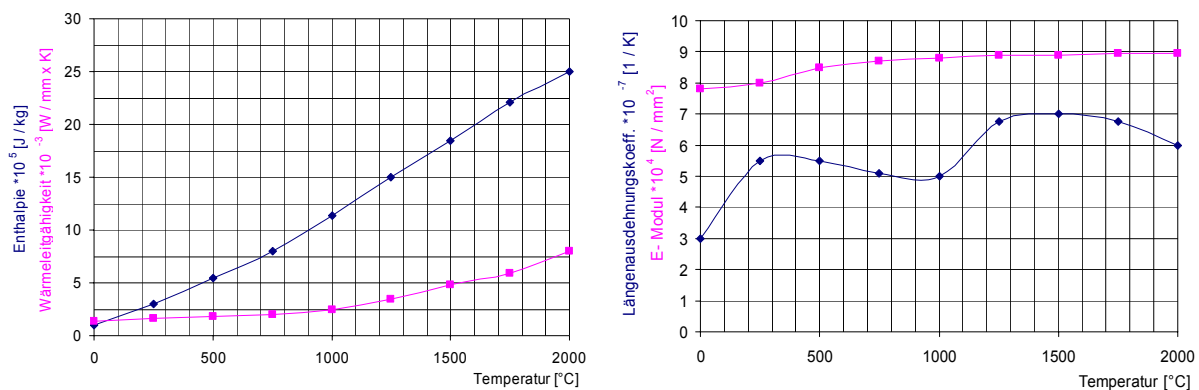


Abbildung 2: temperaturabhängige Materialeigenschaften von Quarzglas – Enthalpie und Wärmeleitfähigkeit (links), Längenausdehnungskoeffizient und Elastizitätsmodul (rechts)

Eine mechanische Besonderheit des Quarzglases stellt sein viskoses Fließverhalten dar. Im Bereich der Raumtemperatur weist Quarzglas ein hochelastisches Verhalten auf. Bei Erreichen der Grenzspannung tritt ein spröder Bruch auf. Im Bereich der Transformationstemperatur (ca. 1250 °C) führt die verminderte Viskosität des Materials zu einem viskosen Fließverhalten, wodurch Spannungen abgebaut werden. Der Einfluss der Temperatur auf die Viskosität ist im folgenden Diagramm dargestellt.

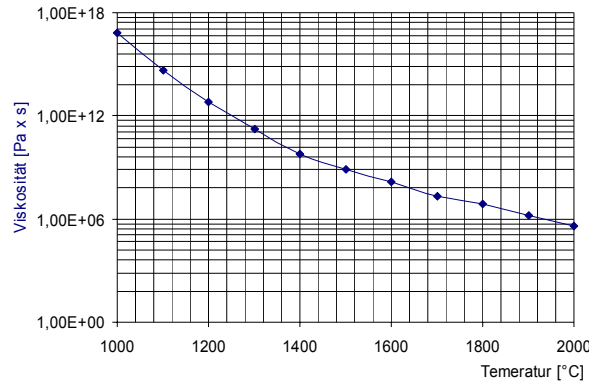


Abbildung 3: temperaturabhängige Materialeigenschaften von Quarzglas – dynamische Viskosität

4 MODELLIERUNG DES ENERGIEEINTRAGS

Bei der Absorption elektromagnetischer Strahlen wandelt sich ein Teil der Strahlung in Wärmeenergie um. Der innerhalb des Materials nicht absorbierte Teil wird transmittiert und besitzt dadurch im Vergleich zur Ausgangsstrahlung veränderte Eigenschaften. Absorptionsvorgänge sind von einer Reihe von Faktoren, wie Oberflächenbeschaffenheit, Wellenlänge und Temperatur abhängig. Beim Auftreffen des Laserstrahls auf die Glasoberfläche beträgt die Absorptionsrate ca. 75 - 78 %. Der restliche Teil der Laserstrahlung wird reflektiert, wodurch sich eine Reflexionsrate von ca. 22 - 25 % ergibt. Die Wellenlänge eines CO₂-Lasers beträgt $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$. Im infraroten Bereich oberhalb der Wellenlänge von $5 \mu\text{m}$ ist die Transmission bei Silikatgläsern gleich null. Nach [Geotti-Bianchini et al., 1991] wird die Strahlung des CO₂-Lasers mit einem Absorptionskoeffizienten von $\beta > 10^3 \text{ cm}^{-1}$ absorbiert. Die optische Eindringtiefe des Laserstrahls definiert mit:

$$\delta_{\text{opt}} = \frac{1}{\beta} \quad (1)$$

Für einen Absorptionskoeffizienten $\beta = 10^3 \text{ cm}^{-1}$ ergibt sich damit eine optische Eindringtiefe von $\delta_{\text{opt}} < 10 \mu\text{m}$. Die optische Eindringtiefe liegt im Bereich der Wellenlänge des CO₂-Lasers. Die Strahlintensität des Lasers ohne weitere optische Lenkung wird mathematisch idealisiert betrachtet als GAUSSnormal verteilt angenommen. Bezogen auf die Intensität des Laserstrahls wird die zylindrisch symmetrische GAUSS-Verteilung (Grundmode TEM₀₀) beschrieben durch:

$$I(r) = I_0 \times \exp\left(-\frac{r^2}{R_L^2}\right) \quad (2)$$

mit I_0 : Intensität auf der Achse ($r = 0$) und R_L : Laserstrahlradius.

Nach Gleichung (2) fällt die Intensität des Lasers mit Erreichen des Strahlradius auf ca. 36,8 % der Ursprungsintensität ab. Durch Integration der Strahlintensität über die Fläche lässt sich die Gesamtlaserleistung berechnen zu:

$$P = I_0 \times \sqrt{\pi} \times \frac{R_L^2}{2} \quad (3)$$

Die Streckenenergie E_v ist als weiterer wichtiger Leistungsparameter durch die Menge an eingetragener Energie pro Strecke definiert:

$$E_v = \frac{P}{v} \quad (4)$$

mit P : Gesamtleistung des Lasers und v : Schweißgeschwindigkeit.

5 MODELLIERUNG DER ENERGIEVERLUSTE AUS KONVEKTION UND STRAHLUNG

Die spezifische Abstrahlung eines Körpers ist proportional zur vierten Potenz der absoluten Temperatur des schwarzen Körpers. Unter der Annahme, dass die Schweißung eines kleinen Werkstückes in einem großen Raum erfolgt, gilt:

$$q_e = \varepsilon \times C_s \times \left\{ \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right\} \quad (5)$$

mit ε : Emissionsgrad, C_s : Strahlungskonstante eines schwarzen Körpers

T_1 : Temperatur des Werkstücks in K und T_2 : Umgebungstemperatur in K.

Der Emissionsfaktor für Floatglas wird in [Hohmann und Setzer, 1997] bei $T = 20^\circ\text{C}$ mit $\varepsilon = 0,91$ angegeben. Neben den Strahlungsverlusten entstehen Energieverluste durch Konvektion. Diese Verluste sind proportional zum Temperaturunterschied von Glasoberfläche und Luft. Es gilt:

$$Q_k = \dot{m} \times c_p \times (v_1 - v_2) \quad (6)$$

mit v_1 : Oberflächentemperatur und v_2 : Lufttemperatur

Fasst man Massenstrom und Wärmekapazität zusammen, ergibt sich:

$$q_k = \alpha_k \times (v_1 - v_2) \quad (7)$$

mit α_k : Wärmeübergangskoeffizient

Werden Konvektions- und Strahlungsverluste zusammengefasst, folgt:

$$q_e = \left[\left(\frac{1}{100} \right)^4 \times \varepsilon \times C_s \times (T_1 + T_2) \times (T_1^2 + T_2^2) \right] \times (T_1 - T_2) \quad (8)$$

Dabei ist festzustellen, dass der Einfluss der Konvektion bei niedrigen Temperaturen überwiegt, wobei mit steigender Temperatur der Einfluss der Strahlung stetig anwächst. Der Einfluss der Temperatur auf die Konvektions- und Strahlungsverluste ist in folgendem Diagramm dargestellt.

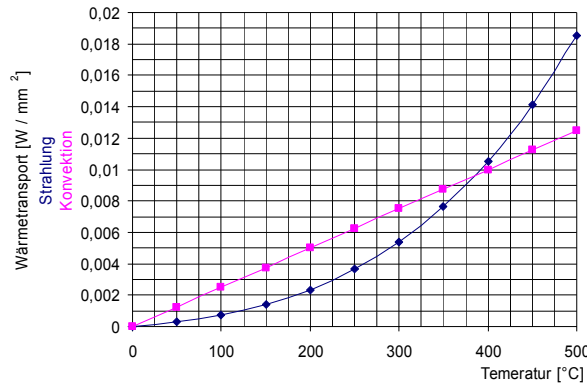


Abbildung 4: Energieverluste durch Konvektion und Strahlung in Abhängigkeit der Temperatur

6 MECHANISCHE BERECHNUNGSMODELLE (RHEOLOGIE)

Für die Berechnung der mechanischen Vorgänge, die während des Schweißvorgangs innerhalb des Quarzglas ablaufen, stehen verschiedene rheologische Berechnungsmodelle zur Auswahl, die die viskosen Materialeigenschaften des Glases abbilden. Dabei werden die drei mechanischen Grundelemente, die HOOKESche Feder, der NEWTONSche Dämpfungszyylinder und das ST.-VENANT-Element miteinander kombiniert. Ein einfaches Materialmodell, das für die Abbildung der viskoelastischen Materialeigenschaften von Glas verwendet wird, ist der MAXWELL-Körper, der aus einer Reihenanzordnung von HOOKScher Feder und NEWTONSchem Zylinder besteht. Eine andere Möglichkeit, das mechanische Verhalten von Glas zu beschreiben, besteht in der Nutzung eines ZENER-Körpers vom MAXWELL Typ. Das Modell besteht aus einer HOOKSchen Feder, die mit dem zuvor beschriebenen MAXWELLSchen Element parallel geschaltet ist. Dieses Modell bildet das mechanische Verhalten von Glas unterhalb der Transformationstemperatur gut ab. Oberhalb dieser Temperatur wächst der viskose Einfluss des Materials stark an, und die Beschreibung mittels dieses Modells wird zunehmend ungenau. In diesem Temperaturbereich erscheint es daher sinnvoll, ein Materialmodell einzusetzen, das die viskosen Materialeigenschaften besser verkörpert. Im zweiten Schritt wird dazu das MAXWELLSche Modell gewählt, wobei die Materialeigenschaften temperaturabhängig eingeführt werden.

6.1 Maxwell Model

Das Modell von Maxwell ist ein einfaches rheologisches Modell, welches die viskoplastischen Eigenschaften von Quarzglas oberhalb der Transformationstemperatur gut abbildet. Es besteht aus einer Reihenanzordnung von HOOKSchen Federelement und NEWTONSchem Dämpfungszyylinder. Diese Anordnung ist in Abbildung 6 dargestellt.

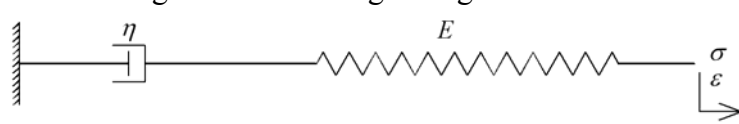


Abbildung 5: rheologisches MAXWELL Modell

Das Kriechverhalten wird nach MAXWELL beschrieben mit:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} + \frac{\sigma_0}{\eta} \times t = \sigma_0 \left[\frac{1}{\eta} \times \left(t + \frac{\eta}{E} \right) \right] = \sigma_0 \times D(t). \quad (9)$$

mit σ_0 : Spannung und η : dynamische Viskosität

Das Relaxationsverhalten wird beschrieben mit:

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 \times E \times e^{-\left(\frac{E}{\eta} \times t\right)} = \varepsilon_0 \times E \times e^{-\left(\frac{t}{\tau_m}\right)} \quad (10)$$

6.2 Linear viskoelastisches Materialverhalten

Das Standard-Solid-Modell stellt eine Erweiterung des Modells nach MAXWELL [Christensen, 1982] dar. Es beschreibt den Zusammenhang zwischen dem End-Elastizitätsmodul E_∞ , dem zeitabhängigen Elastizitätsmodul $E(t)$ und der Viskosität η eines Festkörpers. Die Erweiterung zu dem Modell nach MAXWELL besteht in dem Vorhandensein eines unabhängigen End-Elastizitätsmoduls, wodurch die während eines mechanischen Vorgangs innerhalb des Materials erfolgten Verformungen gespeichert werden. Dieses Modell repräsentiert die mechanischen Eigenschaften von Glas unterhalb der Transformationstemperatur bei geringen Verformungen. Abbildung 3 zeigt schematisch das mechanische Materialverhalten eines viskoelastischen Festkörpers.

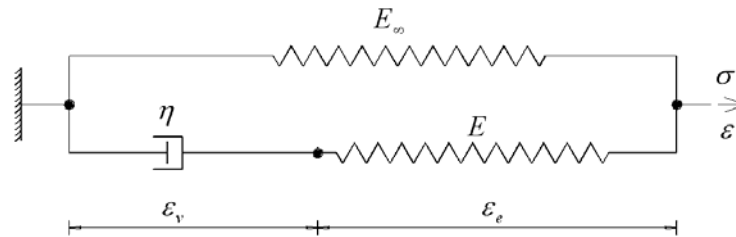


Abbildung 6: rheologisches ZEHNER Modell vom MAXWELL Typ

Der zeitabhängige Elastizitätsmodul $E(t)$ lässt sich wie folgt beschreiben:

$$E(t) = E_\infty + E \times e^{-t/\tau} \quad (11)$$

$$\text{mit: } \tau = \frac{\eta}{E}. \quad (12)$$

Der Elastizitätsmodul eines viskoelastischen Materials kann damit aus einer konstanten Komponente und einem Anteil, der von der Viskosität sowie der Zeit abhängt, beschrieben werden:

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma_\infty + \sigma_{ve}, & \sigma_{ve} &= E \times \varepsilon_e, & \rightarrow & \dot{\varepsilon}_e = \frac{1}{E} \dot{\sigma}_{ve}, \\ \dot{\varepsilon} &= \dot{\varepsilon}_v + \dot{\varepsilon}_e, & \varepsilon &= \frac{1}{E_\infty} \sigma_\infty, & & \\ \dot{\varepsilon}_v &= \frac{1}{\eta} \sigma_{ve}. & & & & \end{aligned} \quad (13)$$

Das Spannungs-Dehnungs-Verhalten für einen viskoelastischen Festkörper lässt sich wie folgt berechnen:

$$\begin{aligned}\sigma &= \sigma_{\infty} + \sigma_{ve} = E_{\infty} \times \varepsilon + \eta \times \dot{\varepsilon}_v \\ &= E_{\infty} \times \varepsilon + \eta(\dot{\varepsilon} - \dot{\varepsilon}_e) = E_{\infty} \times \varepsilon + \eta \times \dot{\varepsilon} - \eta \frac{\dot{\sigma}_{ve}}{E}\end{aligned}\quad (14)$$

$$\begin{aligned}&= E_{\infty} \times \varepsilon + \eta \times \dot{\varepsilon} - \frac{\eta}{E}(\dot{\sigma} - E_{\infty} \times \dot{\varepsilon}) \quad \rightarrow \\ \sigma + \frac{\eta}{E} \dot{\sigma} &= E_{\infty} \times \varepsilon + \frac{\eta \times (E + E_{\infty})}{E} \dot{\varepsilon}\end{aligned}\quad (15)$$

Oberhalb der Temperatur von 1759 °C wird eine vollständige Aufschmelzung des Quarzglas angenommen. Bereiche der Schweißnaht, die über diese Temperatur hinaus erwärmt werden, sind damit spannungsfrei.

Dieses Modell bildet das viskoelastische Festkörperverhalten des Quarzglas unterhalb der Transformationstemperatur gut ab. Oberhalb der Transformationstemperatur nimmt der viskoplastische Einfluss im Materialverhalten stark zu. Um die viskoplastischen Eigenschaften in diesem Temperaturbereich besser abzubilden, ist die Verwendung des zuvor vorgestellten Modells nach Maxwell vorzuziehen.

7 EXPERIMENTELLE SCHWEIßUNG VON QUARZGLASPLATTEN

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Berechnung der thermischen und mechanischen Vorgänge innerhalb des Quarzglas für die durchgeführte Versuchsschweißung von $t = 6$ mm dicken Quarzglasplatten dargestellt. Die Schweißgeschwindigkeit betrug dabei $v_s = 0,3$ mm/s. Die Schweißung erfolgte mit zwei voneinander unabhängigen Laserstrahlen. Ein Laserstrahl mit geringer Energiedichte und großem Laserstrahlradius wurde zum Vorwärmen des Quarzglas genutzt. Der zweite Laserstrahl mit hoher Energiedichte und geringem Strahlradius wurde konzentriert in den Spalt zwischen die Quarzglasplatten gelenkt und entwickelte dort eine Tiefenwirkung. Spezielle Optiken zur Regulierung der Energieverteilung waren nicht vorhanden. Daher wird die Energiedichteverteilung des Laserstrahls als GAUSSnormal verteilt angenommen. Die Gesamtlaserleistung betrug $E = 507,3$ W (Vorwärm-laserstrahl $E = 427$ W, konzentrierter Laserstrahl $E = 81,3$ W).

7.1 Simulation der thermischen Vorgänge

Die Verifikation der numerischen Ergebnisse erfolgt über den Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Temperatur-Zeit-Verläufen für verschiedene Punkte an der Oberfläche der Quarzglasplatte. Dazu wurde je ein Punkt auf der Ober- bzw. Unterseite ausgewählt. Die Lage dieser ausgewählten Punkte im zweidimensionalen Modell ist im Querschnitt der Quarzglasplatte in Abbildung 7 dargestellt.

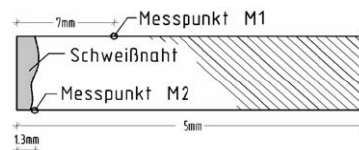


Abbildung 7: Querschnitt des Versuchskörpers mit Lage der Messpunkte

Die Simulation wurde mit verschiedenen Annahmen für die Wärmequelle durchgeführt. Eine Zusammenstellung dieser Eingangsgrößen erfolgt in Tabelle 1.

Tabelle 1: Parameters of der Wärmequelle für verschiedene Simulationen

Parameter der Wärmequelle (Vorwärm Laser)	SIM 1	SIM 2	SIM 3	SIM 4	SIM 5
Effektivleistung [W]	-	-	42,7	42,7	25,6
Strahlradius R_L [mm]	-	-	10	10	10
Eindringtiefe der Laserstrahlung [μm]	-	-	100	10	10
Parameter der Wärmequelle (konzentrierter Laser)	SIM 1	SIM 2	SIM 3	SIM 4	SIM 5
Effektivleistung [W]	65,1	65,1	81,3	32,5	32,5
Strahlradius R_L [mm]	1,5	1,5	1,5	0,5	0,5
Eindringtiefe der Laserstrahlung [μm]	100	100	6000	6000	6000
Gesamtleistung [W]	65,1	65,1	124	75,2	58,1

Für die Wirkung des Schweißlasers wird in den Berechnungen von einer über die gesamte Schweißnahttiefe wirkenden Wärmequelle ausgegangen. Die Intensität der Laserleistung nimmt dabei über die Tiefe linear ab. Nachfolgend werden die Ergebnisse der thermischen Berechnung des transienten Temperaturverlaufs für die in Abbildung 7 dargestellten Messpunkte dargestellt.

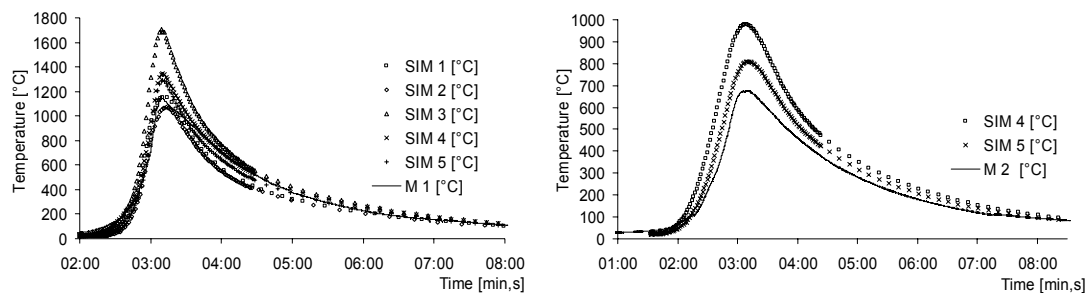


Abbildung 8: Temperatur- Zeit Diagramm für Simulation und Versuchsmessung (Messpunkte M1 und M2 aus Abbildung 7)

Dabei ist für die Simulation 5 eine gute Übereinstimmung zwischen experimentell gewonnenen Daten und den Ergebnissen der thermischen Berechnung festzustellen. Das Temperaturfeld in Schweißnahtebene während des Schweißvorgangs ist in Abbildung 9 dargestellt.

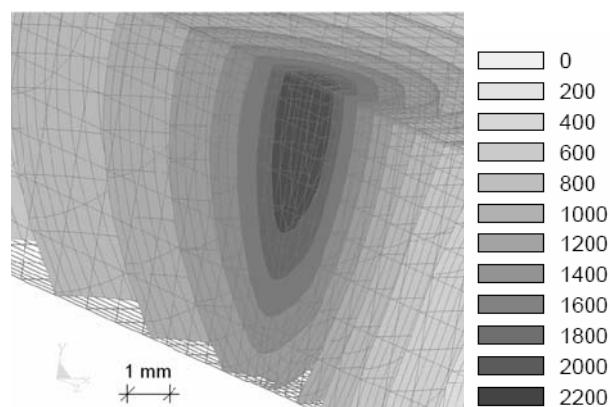


Abbildung 9: räumliches Temperaturfeld innerhalb der Naht während des Schweißvorgangs

Der Temperaturunterschied zwischen Nahtoberseite und Nahtunterseite beträgt dabei ca. 900 °K. Dies führt zu einem großen Unterschied in den Viskositäten von Nahtoberseite zu Nahtunterseite innerhalb des Schmelzbades und wirkt sich auf die Qualität der Schweißnaht ungünstig aus. Eine Optimierung des Schweißvorgangs auf der Basis numerischer Analysen ist daher vorteilhaft. Der Einsatz von je zwei Laserstrahlen auf Ober- und Unterseite der Naht stellt eine mögliche Variante dar. Das daraus resultierende Temperaturfeld ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

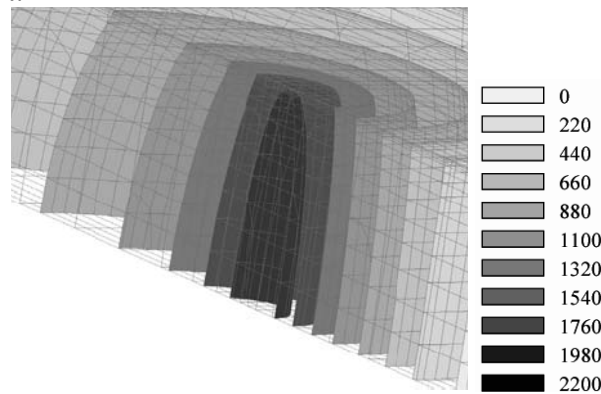


Abbildung 10: räumliches Temperaturfeld im Nahtbereich (Glasoberseite bis Glasplattenmitte) bei der Anwendung eines zweiseitig symmetrischen Schweißverfahrens

Die Verwendung eines doppelseitigen Schweißverfahrens verringert die Temperaturunterschiede innerhalb der Schweißnaht deutlich. Dies führt zu einem verbesserten Fließverhalten innerhalb des Schmelzbades und ermöglicht eine Verbesserung der Nahtqualität.

7.2 Simulation der mechanischen Vorgänge

Die mechanische Simulation erfolgt im Anschluss an die Berechnung des transienten Temperaturfeldes. Ziel dieser mechanischen Simulation ist die Abschätzung der während der Schweißung entstehenden Spannungen in den Quarzglasplatten. Dazu wird das zuvor kalibrierte thermische Berechnungsmodell aus Simulation 5 verwendet. Die hier vorgestellte Auswertung beschränkt sich auf die Darstellung der Normalspannung σ_x senkrecht zur Schweißnahtebene.

Simulation unter Nutzung des STANDARD SOLID Modells

Bei dieser mechanischen Berechnung wird das STANDARD SOLID Model verwendet, das die mechanischen Vorgänge innerhalb von Quarzglas unterhalb der Transformationstemperatur zutreffend abbildet. Das verwendete Modell basiert auf dem rheologischen ZENER-Körper vom MAXWELL Typ. Die Berechnungen werden transient nichtlinear durchgeführt, wodurch eine Aussage über die zeitabhängige Entwicklung der Spannungszustände möglich ist. Bei der Entwicklung der Normalspannung in x-Richtung werden zwei verschiedene Phasen durchlaufen. Während des Schweißens, kurz vor Erreichen der Maximalintensität des konzentrierten Schweißlasers, wird die Schweißnaht über die gesamte Tiefe stark erwärmt. Die während des Schweißvorgangs auftretende Zugspannung an der Schweißnahtunterseite resultiert aus der schwächeren Erwärmung infolge der kegelförmigen Energieverteilung des Schweißlasers. Bei der Abkühlung entwickeln sich in Bereichen, die während des Schweißvorgangs viskoelastische Stauchungen bzw. Dehnungen erfahren haben, jeweils Zug- bzw. Druckspannungen (Abbildung 11).

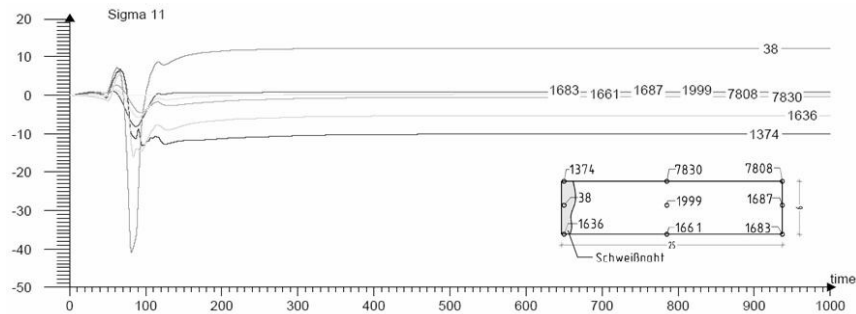


Abbildung 11: zeitabhängige Entwicklung der Normalspannung für ausgewählte Punkte orthogonal zur Querschnittsebene (Zeit in s, Spannung in N/mm²)

Im Endzustand, nach vollständiger Abkühlung, existiert in Nähe der Schweißnaht ein für das Glas günstiger Eigenspannungszustand, der annähernd dem Eigenspannungszustand von thermischen vorgespannten Sicherheitsglas entspricht. Auf der Oberseite der Schweißnaht entstehen Druckspannungen von etwa $\sigma_x = 10 \text{ N/mm}^2$, im Zentrum der Schweißnaht Zugspannungen von ca. $\sigma_x = 13 \text{ N/mm}^2$ (Abbildung 12).



Abbildung 12: Eigennormalspannung im Bereich der Schweißnaht orthogonal zum Querschnitt [N/mm²]

Simulation unter Nutzung des “viscous” Modells (MAXWELL Modell)

In dieser mechanischen Berechnung wird das MAXWELLSche Modell verwendet. Die Simulation erfolgt transient nichtlinear, mit temperaturabhängigen Materialkennwerten. Geometrieparameter, sowie thermische Einflussgrößen wurden dabei nicht verändert. Die folgende Abbildung zeigt die resultierende Eigennormalspannung in Plattenquerrichtung orthogonal zur Nahtebene.



Abbildung 13: Eigennormalspannung im Bereich der Schweißnaht orthogonal zum Querschnitt [N/mm²]

Die berechneten Eigennormalspannungen betragen dabei $\sigma_x = -6 \text{ N/mm}^2$ an der Nahtoberfläche und $\sigma_x = 14 \text{ N/mm}^2$ in Schweißnahtmitte. Der Druckspannungsbereich besitzt dabei in Tiefenrichtung des Glases eine größere Ausdehnung, was durch die im Vergleich zum Standard Solid Model höheren viskoplastischen Dehnungen oberhalb des Transformationspunktes hervorgerufen wird.

8 LASERSTRAHLSCHWEIßEN VON QUARZGLASROHREN

Im nachfolgenden Abschnitt werden die Berechnungsergebnisse der thermischen und mechanischen Vorgänge während einer Laserstrahlschweißung von Quarzglasrohren dargestellt. Die dabei verwendeten Schweißparameter sind aus den erfolgten Versuchsschweißungen von Quarzglasplatten abgeleitet. Die numerische Simulation erfolgt für eine Stumpfnahtschweißung von Quarzglasrohren mit $d = 50$ mm Außendurchmesser und einer Wandstärke von $t = 5$ mm. Die Schweißgeschwindigkeit beträgt $v_s = 0,5$ mm/s.

8.1 Simulation der thermischen Vorgänge

Die Simulation des Energieeintrags wurde analog zur Schweißung von Quarzglasplatten mit zwei voneinander unabhängige Wärmequellen durchgeführt. Der Vorwärmelaserstrahl mit großem Strahlradius und geringer Spitzenintensität bewirkt einen effektiven Oberflächenenergieeintrag von $E = 178$ W. Ein weiterer Laserstrahl mit geringem Strahlradius und hoher Spitzenintensität wird in den Spalt zwischen die Quarzglasrohre gelenkt. Die effektive Leistung des konzentrierten Laserstrahls beträgt $E = 56$ W. Bei den Energieverlusten durch Konvektion und Strahlung wird eine Abminderung dieser Effekte auf der Rohrrinnenseite berücksichtigt. In der folgenden Abbildung ist das transiente Temperaturfeld im Nahtbereich für den Zeitpunkt des Schweißvorgangs dargestellt.

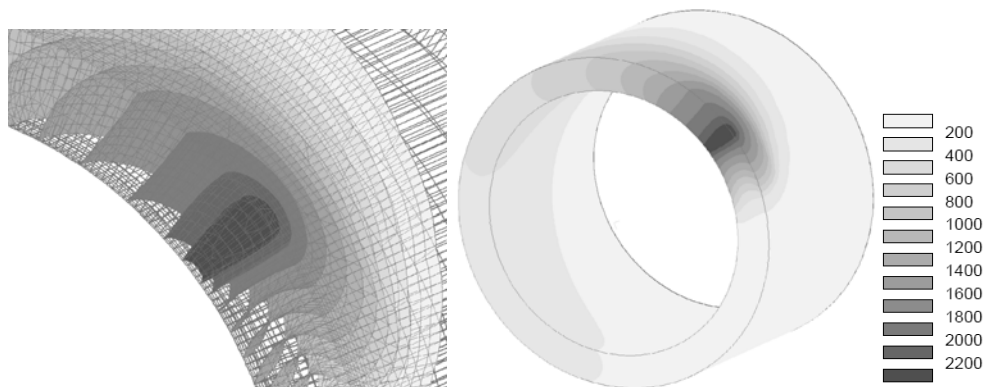


Abbildung 14: Temperaturfeld im Nahtbereich während der Schweißung [°C]

Die im Vergleich zur Plattenschweißung erhöhte Laserleistung führt zur Ausbildung eines über die Schweißnahttiefe sehr gleichmäßigen Temperaturfeldes. Die berechnete Spitzentemperatur von $T_{\max} = 2500$ °C liegt dabei unterhalb der Zersetzungstemperatur von SiO_2 von $T_v = 2800$ °C [nach Holleman-Wiberg].

8.2 Simulation der mechanischen Vorgänge

Die thermische Simulation der Rohrnahtschweißung ergab im Schmelzbadbereich Temperaturen bis $T_{\max} = 2500$ °C. Die Schmelzbadtemperatur liegt damit in einem Temperaturbereich weit oberhalb der Transformationspunktes $T_G = 1250$ °C. Daher erfolgt die mechanische Berechnung mit dem Modell von MAXWELL, was das viskoplastische Materialverhalten oberhalb der Transformationstemperatur besser berücksichtigt als das STANDARD SOLID Model.

Simulation unter Nutzung des “viscous” Modells (MAXWELL Modell)

Grundlage dieser mechanischen Berechnung ist das Modell nach MAXWELL, was zuvor auch bei der mechanischen Simulation der Plattenschweißung verwendet wurde. Im Ergebnis dieser Berechnung zeigt sich ein starker geometrischer Einfluss, der durch die Krümmung des Rohres hervorgerufen wird. Das Überschweißen des Anfangspunktes der Naht führt zu einer Unstetigkeit in der Spannungsausbreitung. Die Eigennormalspannungen in Rohrlängsrichtung sind in der folgenden Abbildung dargestellt.

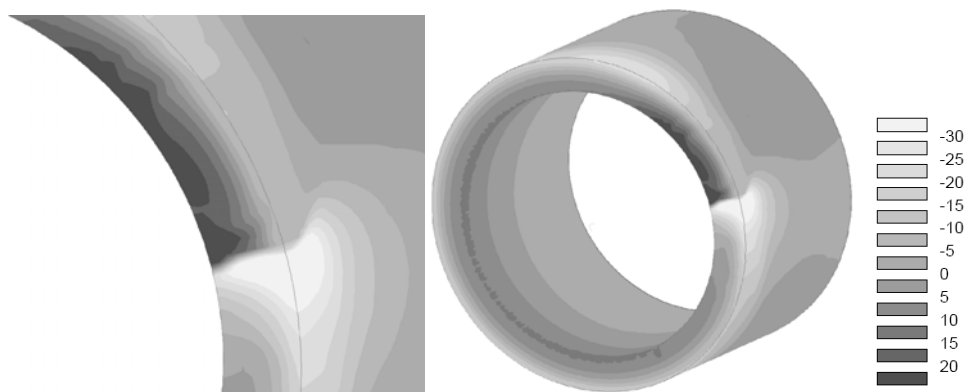


Abbildung 15: Eigennormalspannung in Rohrlängsrichtung nach dem Schweißvorgang [N/mm²]

Die Eigenspannungsverteilung weist eine Unstetigkeit im Bereich der Nahtüberschweißung auf. Diese Unstetigkeit kann durch geeignete Vorwärmmaßnahme abgeschwächt werden. Eine Möglichkeit besteht im verzögerten Abschalten des Vorwärm laserstrahls, der nach Beendigung des Schweißvorgangs den Abfall der Temperatur reduziert.

9 ZUSAMMENFASSUNG

Die Nutzung der Finiten Elemente Methode gestattet es, die thermischen und mechanischen Vorgänge innerhalb des Glases während des Schweißvorgangs und nach vollständiger Abkühlung berechnen zu können. Dadurch entsteht die Möglichkeit, den Schweißvorgang durch eine Optimierung der Verfahrensparameter gezielt zu beeinflussen, die Wirtschaftlichkeit des Schweißverfahrens zu verbessern, und ein zuverlässiges Schweißergebnis zu erhalten. Dabei können auch, nur unter hohem experimentellen Aufwand durchführbare Versuche simuliert werden. Die Simulation ermöglicht es, eine effektive Vorauswahl der erforderlichen Versuche zu treffen die in der Praxis durchzuführen sind. Dies führt zu einer Reduzierung des experimentellen Aufwandes und damit zu einer Verkürzung des Entwicklungszeitraumes für das angestrebte Verfahren.

Die durchgeführten Experimente haben gezeigt, dass für die thermisch untersuchten Punkte zwischen den gemessenen und numerisch berechneten transienten Temperaturverläufen eine gute Übereinstimmung besteht. Dieses resultiert aus der exakten Beschreibung des Energieeintrages mit unterschiedlichen Wärmequellen (Vorwärm- und Schweißquelle). Zur Reduzierung der thermischen Belastung im Quarzglas während des Schweißprozesses wird eine weitere Variante mit gegenüberliegenden Laserquellen und je zwei zusätzlichen Wärmequellen untersucht. Die durchgeführten Berechnungen zur Ermittlung der Spannung erfolgten bisher auf Grundlage zweier unterschiedlicher viskoelastischer Materialgesetze.

Eine experimentelle Ermittlung von Eigenspannungen ist geplant um die mechanischen Simulationsergebnisse zu kalibrieren.

Weiterhin soll die Technologie des Laserstrahlschweißens ausgehend von Quarzglas auch auf das Schweißen anderer Glassorten ausgedehnt werden. Für die freundliche Unterstützung und die Durchführung der Versuche durch das Institut für Fügetechnik und Werkstoffprüfung in Jena wird an dieser Stelle gedankt.

REFERENCES

- [1] Christensen, R. M. 1982, „Theory of viscoelasticity – An Introduction” Academic Press Inc.
- [2] ESI-Group (2005), „SYSWELD 2005 Reference Manual”.
- [3] Geotti-Bianchini, F., De Riu, L., Gagliardi, G., Guglielmi, M. und Pantano, CG. (1991), „New Interpretation of the IR reflectance spectra of SiO₂-rich films on soda-lime glass”, Glastechn. Berichte, Jg. 64, H. 8, S. 205-217.
- [4] Hohmann, R., Setzer, M. J. (1997), „Bauphysikalische Formeln und Tabellen“, 3. Auflage, Werner-Verlag, Düsseldorf.
- [5] Holleman-Wiberg: Lehrbuch der anorganischen Chemie, 34. Edition, 101. Auflage, Walter de Gruyter & Co., Berlin, 1995
- [6] Radaj, D. (1999), „Schweißprozesssimulation, Grundlagen und Anwendung“, DVS-Verlag, Düsseldorf.
- [7] Wächter, S., Kasch, S. und Müller, H. (2002), „Laserfügetechnologie für Glas und Keramik“, DVS-Berichte Band 211, S.87-95.